

光波測距による雲仙火山, 眉山における山体変動観測

斎藤英二* 須藤 茂** 渡辺和明* 馬越孝道***

Eiji SAITO, Shigeru SUTO, Kazuaki WATANABE and Kodo UMAKOSHI (1998) Ground deformation monitoring of Mayu-yama, east of Unzen Volcano, Kyushu, by EDM. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 49 (7), p. 371-377, 7 figs.

Abstract: Mayu-yama Volcano is composed of dacite lava domes, and lies 4 km east of Fugendake, Unzen Volcano in the middle west Kyushu, Japan. During the eruption of Unzen Volcano in 1792, the east slope of Mayu-yama collapsed, and 15,000 person were killed by debris flow and tsunami. The last eruption of Unzen Volcano, started in 1990, reminded the local residents about the imminent collapse of Mayu-yama in the near future. So, the EDM (electro-optical distance measurement) network was established on the east flank of Mayu-yama to monitor the ground deformation of the steep-slope mountain. No significant changes the slope distances was found by the network during the observation term (from 1991 to 1997). Steady and minor changes of about 1 to 2 cm in total for each line have been observed during these six years. These changes should be considered to be caused by the tectonic movement in this area.

要 旨

1990年11月に雲仙普賢岳で噴火活動が始まったことにより, 島原市街地西方にそびえる眉山について, 1792年の大災害「島原大変肥後迷惑」同様の崩壊に対する懸念が高まった。そのため, 眉山東麓に放射状の観測網を設置し, 山体変動観測を試みた。観測は, 最終的に山腹から山を望む2測線と, その反対方向の1測線について継続され, そのうちの山側の1測線については, コンピュータ制御により自動連続観測を実施した。

約6年間の観測の結果, 山側の測線で1-2 cmの斜距離の短縮が認められたのみで, 崩壊に結び付くような顕著な変動は検出されなかった。観測された微小な距離変化は恒常的であり, 島原半島内の小ブロックのテクトニックな変動の一部を捉えた可能性がある。得られた観測値を速やかに行政側に伝えることにより, 流言情報による混乱を避けることに貢献できた。

1. はじめに

雲仙, 普賢岳は1990年11月に約200年ぶりに噴火活動を再開した。前回の1792年の噴火では, 普賢岳の溶岩流出の活動にもまして, 噴火の約3箇月後に発生した眉山

山体崩壊による直接的, 間接的被害が顕著であった。いわゆる「島原大変肥後迷惑」の名で知られる, 我が国の災害史の中でも特筆すべき火山災害である。崩壊の原因としては, 古くから地震動によって崩壊したとする説(大森, 1908など)と火山爆裂現象とする説(駒田, 1913など)が提唱されてきたが, その後, 片山(1974)による熱水増大説, 太田(1987)による地震・熱水複合説が提案された。いずれにせよ, 崩壊を発生させた原因の一つに, 先行した普賢岳の噴火活動が関係していたことは明らかである。

この200年前の経験は, 研究者のみならず, 広く住民にも周知されており, 普賢岳の噴火活動から再び眉山の崩壊に至る可能性について危惧がもたれた。また, 既に太田(1984)は, 眉山の大規模な崩壊は1792年の一度だけではなかった可能性を指摘している。筆者等は, このような経緯から山体崩壊発生の可能性も視野にいれた山体の安定性調査を行うために光波測距(Electro-optical Distance Measurement, EDM)システムを設置し, 観測を継続した。本論では, 1991年3月から1997年4月までのデータについて取りまとめたので報告する。

2. 眉山の概要

眉山は, 雲仙, 普賢岳の東約4 kmに位置する角閃石デイサイトの溶岩円頂丘である(渡辺・星住, 1995)。山体は東西約2 km, 南北約4 kmで, 北側の七面山(標高

*地質情報センター(Geological Information Center, GSJ)

**環境地質部(Environmental Geology Department, GSJ)

***九州大学理学部島原地震火山観測所(Shimabara Earthquake and Volcano Observatory, Faculty of Science, Kyushu Univ.)

Key words: Unzen Volcano, Mayu-yama, Shimabara Collapse, EDM, ground deformation

819m) と南側の天狗山の南北2峰からなる(第1図)。

1792年の山体崩壊は、南側の天狗山東半部で発生した。古文書などの詳細な検討結果(片山, 1974)によれば、崩壊は、新焼溶岩噴出開始から約3箇月後の5月21日の夜8時過ぎ、2回の強い地震の後に大音響とともに発生したらしい。崩壊量は0.34立方kmで、海岸線は最大約800m前進したという。崩壊による多量の土砂やブロックの海への突入によって発生した津波は、波高10mにも達し、対岸を含む沿岸で合計約15,000人もの死者を出す災害となった。

崩壊の痕跡は、東向きに開いた馬蹄形の崩壊壁や、その下部から海岸にかけて扇型に広がって分布する流れ山を有する岩屑なだれ堆積物地形として残されている。

ところで、崩壊の1箇月前の三日朔地震(島原で震度5-6)を最大とする群発地震の際には、東西方向の地割れや地下水位の異常が多数発生している。崩壊の22日前には、崩壊の中心部付近にあった楠木山(または楠平)

と呼ばれる小丘が、2-300m地滑りを起こしている。これらは、大崩壊の前兆現象と考えられている。

3. 観測方法

観測網を第1図に示す。観測は眉山山体の東方から光波測距儀で斜距離(以下距離)および角度を観測する方法を用いた。第1図のG点は器械点であり、島原市の陸上競技場の脇に位置する。A点、B点、およびC点は眉山東斜面上の反射鏡点である。器械の異常や器械点の変動を検証する目的で、山と反対側に位置するR点にも反射鏡を設けてある。観測は1991年3月から開始した。なお、A点については、当初は観測を行ったが、普賢岳の火山活動が活発化し、反射鏡を増設する必要が生じたため、A点の反射鏡を普賢岳に移設した。その後、火砕流の発生が頻発し、A点へ行くことが危険と判断され、反射鏡の再設置を行わなかったため、現在まで観測を



第1図 眉山の地形と光波測距観測線。実線は1792年の崩壊および堆積域、G: 光波測距システム設置点、A, B, C, R: 反射鏡設置点。地形図は国土地理院発行の5万分の1地形図「島原」を使用。

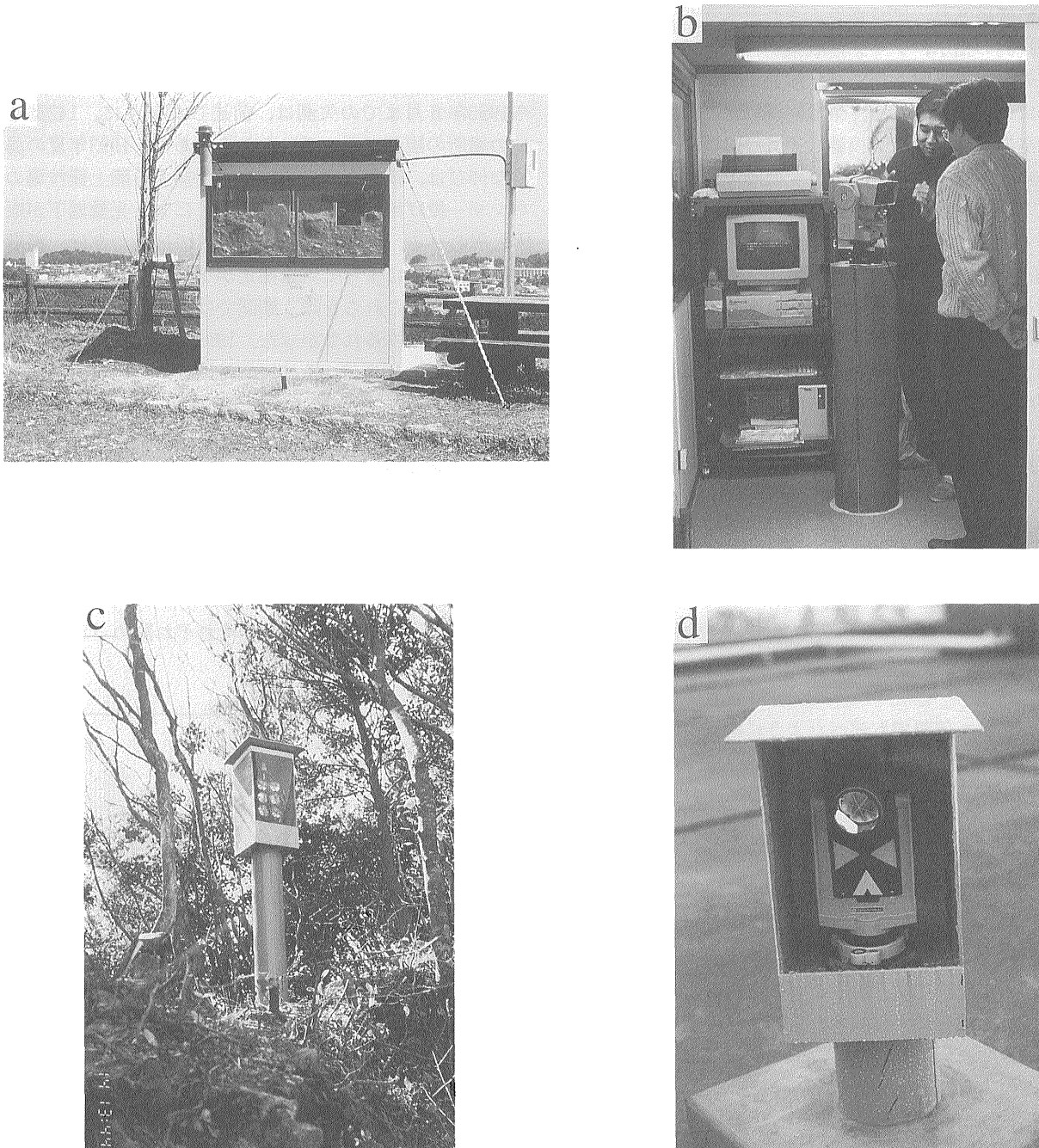
Fig. 1 The topography and EDM network around Mayu-yama. Solid line shows the collapse wall and the distribution of the deposit of 1792 collapse. G: EDM station; A, B, C and R: reflector targets.

行っていない。

R点を除く各点の構造は、次のとおりである。G点は、地表下1 mまで掘り下げ、約1 m四方にコンクリートをべた打ちし、その中央に直径約20 cm、長さ約2 mのコンクリート製円柱を直立させ、上面に5/8ピッチネジ付きのステンレス製円盤を付けて観測台とした。観測台の上部から約1 mを残して元の地表面まで埋め戻した後に、観測機器を風雨等から守るための空調設備付きの観測小屋を立てた(第2図a)。小屋の床は、1.8 m ×

1.8 mの広さがあり、床全体をコンクリート敷きとしたが、前述の観測台とは直接接触しないようにしてある。光波測距儀は観測台上面に設置される(第2図b)。観測台の地表露出部分周囲は、日射による部分的な温度上昇を妨げるため、断熱シートで覆ってある。

反射鏡点のA点、B点およびC点も基礎および円柱部分に関しては、G点と同様の構造であるが、円柱の直径は約15 cmである。円柱上面の反射鏡の取り付け部分には、前面に透明ガラスをはめた塩化ビニール製カバー



第2図 観測点および反射鏡点の外観。a: 自動光波測距システムの観測小屋外観, b: 内部, c, d: AとR反射鏡点。
Fig. 2 The computer controlled automatic EDM instrumentation in the dog house (a and b), and reflector targets, A and R (c and d).

が付けてある(第2図c)。R点は島原市役所屋上のコンクリート面に50cm四方の基礎を設置し、その上に反射鏡を固定するための台座を取り付けた構造である(第2図d)。

光波測距儀は、ジオジメータ142型(以下142型とする)とトプコンGTS 3型(以下GTS 3型とする)を使用した。これらは角度読取機能の付いたトータルステーションである。測距精度は、それぞれ $\pm(5\text{mm}+2\text{ppm})$ 、 $\pm(2\text{mm}+2\text{ppm})$ 、角度の最小読定値は、それぞれ $2''$ と $5''$ である。142型はパーソナルコンピュータ(以下PCとする)に接続され、プログラムされたスケジュールで自動的に観測の指示、データの収集が行われる。距離の気象補正のための気温と気圧は、観測小屋に取り付けたセンサーにより観測される。気温観測には、東邦電子製の白金測温抵抗体と温度変換器TTM-104型を用いた。気圧観測には、ヴァイサラ製気圧変換器PTB100A型を用いた。

PCのハードディスクには、観測日時、水平角、天頂角(以下鉛直角)、無補正の距離、気圧、気温が一時的に蓄えられる。これらは、茨城県つくば市の地質調査所から任意時刻に電話回線を経由して取得される。GTS 3型は、142型が普賢岳の観測のために使用されていた1993年9月から1995年6月までの間に使用したもので、観測者がその都度、器械を設置し観測する方法で用いられた。自動あるいは手動のいずれの方法でも、視準方向の変更は人力によらなければならない。この作業は現地の測量設計会社に依頼し、設置当初は2日に1回の割合で、1992年7月からは週1回程度の割合でR点、B点、C点の3方向の観測を行った。

4. 観測結果

観測データは、前項でも述べたように観測日時、水平角、鉛直角、無補正の距離、気圧および気温である。これらはR点、B点、C点の3方向についてそれぞれ得られ、その内C点方向と一部B点方向については、10分または30分間隔の自動観測によるデータも得られた。

角度のデータは、変動方向を把握するために必要だが、特に鉛直角は屈折の影響を受けやすいため、一般に距離観測の精度より劣る。また、火砕流が頻発した1991年から1993年にかけては、距離観測は可能でも、視通が妨げられて反射鏡を捉えられないことも度々あった。したがって、角度変化については、手動観測の項で簡単に触れるのみとする。

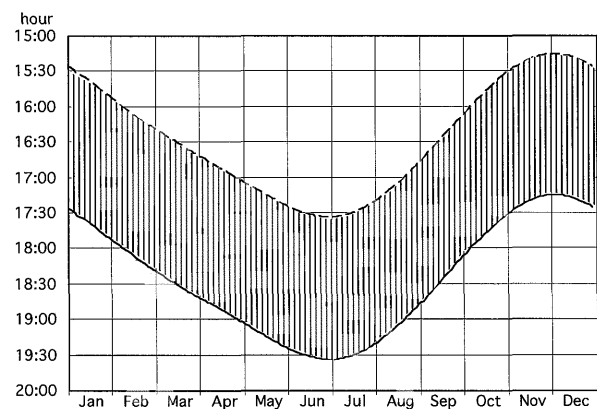
4.1 自動観測

自動観測のデータは、全体で8.3MBの量がある。さらに、主に気温観測に起因する日周変化も加わるため、全データを時系列でプロットすると、変動が不明瞭になる

傾向がある。日周変化とは、気温観測が観測点の地表近くのみで行われているために、レーザー光が通過する上空と比べて、日中では高めに、夜間では低めに観測される傾向があり、それによって昼間の距離は過剰補正されて長めに、夜間では補正不足により短めになる、見かけ上の周期的距離変化のことである。この影響を軽減するため、今回は、鉛直方向の気温の変化の影響が比較的小さい日没2時間前から日没までに観測されたデータのみを選択した。日没の時刻は天測略歴(海上保安庁水路部、1993)の長崎港のデータを使用した。一年間の選択時間帯の変化は第3図のようになる。この時間帯に含まれる1日の連続観測データの平均値をその日の代表観測値とした。第4図はそれらの経時変化である。1993年9月から1995年6月までの欠測は、前述したように、142型を他の場所の観測に用いていたためである。1993年夏の異常な伸びは、視準方向の障害物(隣接する陸上競技場のハンマー投げ用移動式防護ネット)による光量低下が原因と思われる。1995年6月から11月のばらつきは、温度変換器の故障によって気象補正が正しく行われなかったためである。これらを除く期間では、1993年夏までは、顕著な変動はみられなかった。1995年12月以降は伸びの傾向が読みとれるが、その開始時期は、このデータからは不明である。

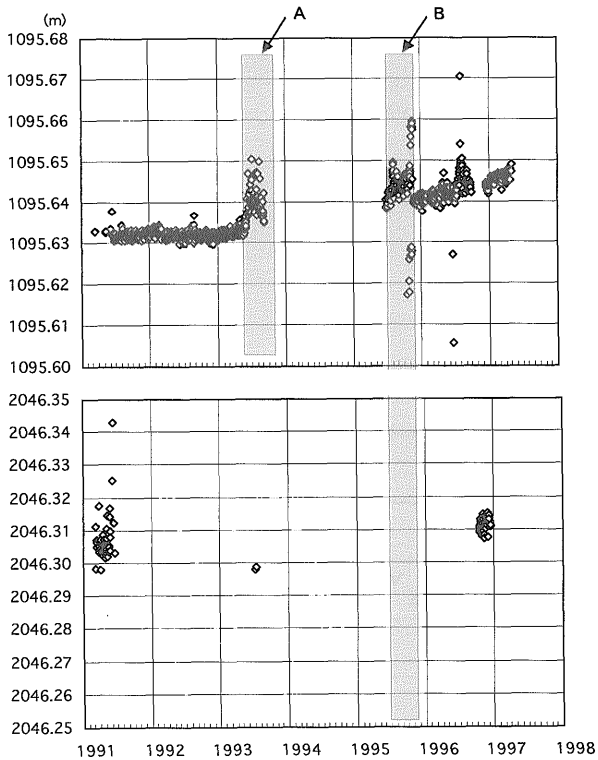
4.2 手動観測

第5図は、G点からR点、B点およびC点の手動観測の距離変化である。前述したようにハンマー投げネットや温度変換器の故障の影響が明らかにあるが、G-BとG-Cには、1991年から1-2cmの伸びが、G-Rには変化量は小さいが縮みの傾向がそれぞれ認められる。各

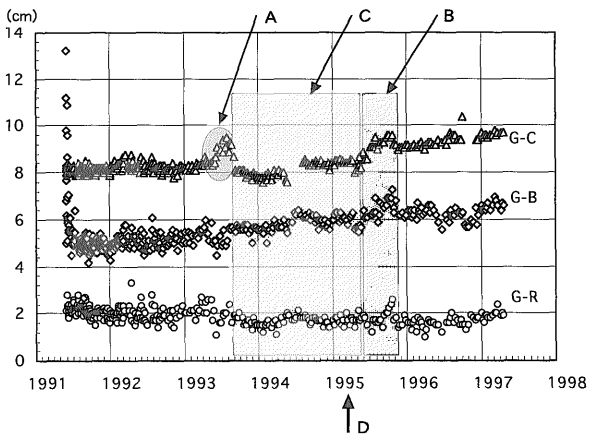


第3図 連続光波測距データを採用した時間帯。日没2時間前から日没までの時間に観測されたデータのみを抽出、平均した。日没の時刻(実線)は長崎港の値を使用した。

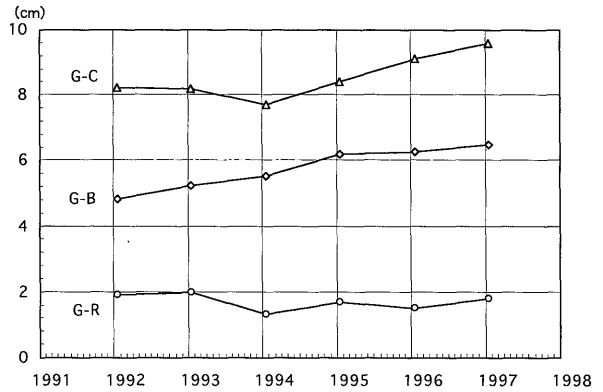
Fig. 3 Method for the EDM data selection. The slope distance data during two hours before the sunset was selected, and the average value for each day has been calculated and used for the discussion. The sunset timings (solid line) are those recorded by Nagasaki harbour.



第4図 自動光波測距による距離変化。上: G-C, 下: G-B, A: 光路上の障害物による影響, B: 温度変換器の異常。
Fig. 4 Change in slope distance as recorded by computer controlled EDM system. Upper: G-C, lower: G-B.



第5図 手動観測による距離変化。A: 光路上の障害物による影響, B: 温度変換器の異常, C: GTS 3による観測, D: 普賢岳の表面上の噴火活動停止。距離はG-C, G-B, G-Rそれぞれ1095m, 2046m, 1839mシフトして表示してある。
Fig. 5 Change in slope distance as recorded by manually operated EDM observation. Upper: G-C, lower: G-B, A: influence of artificial obstruction on the beam pass, B: temperature converter trouble. C: measured by the EDM instrument, TOPCON GTS3, D: end of the magma extrusion activity on the Fugendake. The distances of 1095m, 2046m and 1839m were subtracted from the observed distances for G-C, G-B and G-R for presentation.



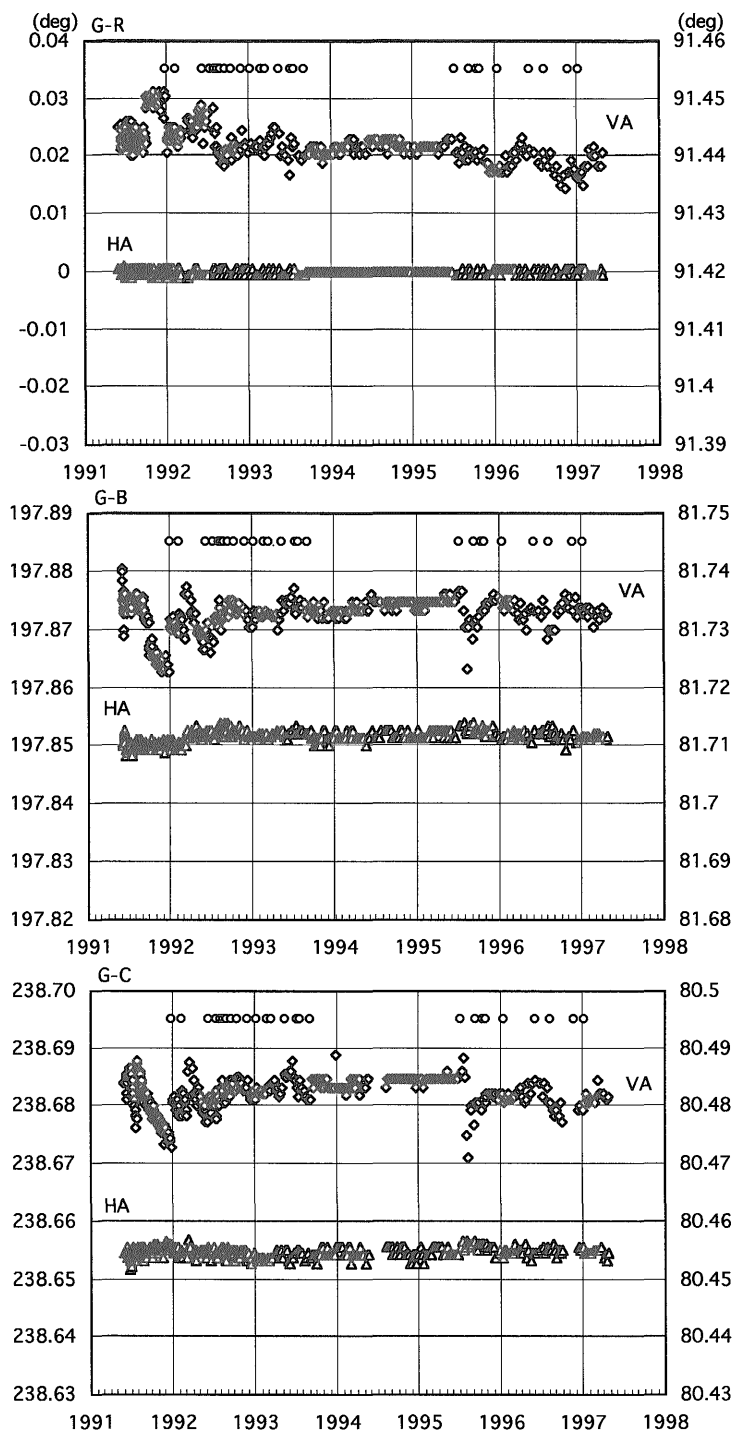
第6図 手動観測による距離変化。各年1月の平均値のみを採用し, 季節変化を除いてある。
Fig. 6 Change in slope distance as recorded by manually operated EDM observation for each calculated average value in January to remove the effect of seasonal change.

年の1月の観測値のみの平均をプロットすると第6図のようになる。G-CとG-Rは, 1994年から1995年頃まではほぼ同じような動きを示しているが, それ以降はG-Cのみが伸びに転じている。G-Bは1995年までに約1.3 cmの伸びを示し, 全期間の変動量の大半がこの時期までに生じている。

第7図は, G-R, G-B, G-C各測線の角度変化を示す。R点を零方向とした水平角には大きな変化は認められなかったが, 鉛直角は約 ± 0.01 度 (± 36 秒)に達する大きな変化を示している。図中の○印は, 光波測距儀の整準を行った日である。ただし, GTS 3を用いた期間は毎回整準しているので省略してある。器械および観測台の地表露出部は, 観測方法の項でも述べたように, 気温や直射の影響を受けにくい構造になっている。にもかかわらず, 整準調整を行う程度に気泡が変化するのは, 器械あるいはそれを載せている観測台を含めた部分が何らかの原因で傾動した可能性もある。しかしながら, 鉛直角変化は142型の観測期間のみに顕著に現れている。142型とGTS 3型には, とともに自動補償機構が採用されている。これは, 器械がある程度の範囲内で傾いても, 自動的に水平または鉛直方向を補正する機構であり, 観測の始めに器械を180度回転させて観測を行うことによって正しく機能する。毎回整準するGTS 3型では問題ないが, 一度整準したら長期間放置したままになる142型による観測では, それが十分に機能しなかった可能性がある。したがってここでは, 鉛直変化の原因の多くの部分は, 142型の器械固有の問題によるものと考えられる。

4.3 観測結果の解釈と意義

観測期間内では, 各測線で顕著な距離変化は認められなかった。眉山の周辺では, このほかにも多種の観測が



第7図 手動観測における角度変化。VA: 鉛直角 (天頂角), HA: 水平角 (R 方向基準), 丸は整準調整日。
 Fig. 7 Change in angle as recorded by manually operated EDM observation. VA: vertical angle (Zenith angle), HA: horizontal angle (reference target R), Circle: The adjusted date of leveling up EDM.

行われているが、異常な観測値の報告はない。これらのことから、眉山において、観測期間を通じて顕著な山体変動はなかったものと判断される。

普賢岳の火山活動が活発であった一時期、「眉山斜面に地割れができており、崩壊するのではないか」との情報が流れたことがある。地質調査所の光波測距観測網では異常がないことが明らかであり、結局地割れ情報は流

言飛語であることが明らかになった。このような状況では、観測データそのものの有無は決定的に重要であり、多少なりとも災害対策に貢献できた。

観測期間を通じた各測線の微量の距離変化の原因は、今回の観測では明らかにすることができなかった。この変化を有意とするためには、機器の経年変化の有無の確認と除去が必要になる。この点に関して、今回の観測は

反省すべき部分を残している。しかしながら、例えば距離が少しずつ短めに観測される場合のように、経年変化が一定傾向で進行していると仮定した場合、G-Cが伸びてG-Rが縮むような相反する変化は説明できない。

島原半島内の6点のGPS観測（国土地理院，1996）における水平方向の変動方向は様々である。日本列島全体の動きだけでなく、このような狭い範囲内でも、細かなブロックに分かれて変動していることが推測される。今回の光波測距観測網の中でも、測線がそのようなブロックの境界をまたいでいた可能性がある。

地質調査所では、今回初めて長期間にわたる光波測距儀による観測を、一部自動連続を用いて行った。観測機器の各部分は、既に関与されたものを用いたが、全体のシステムを正常に機能させるためには、様々な問題点があった。一連の作業を通じてそれらを克服する技術が得られた。

5. ま と め

普賢岳の1990年噴火を機に、眉山の山体変動を観測するための光波測距観測網を設置し、1991年から1997年まで観測を継続した。その結果、

1. 観測期間全体を通じて、顕著な山体変動は認められなかった。
2. 微小な動きとしては、山側の反射鏡点と器械点間の距離が1-2 cmの伸びを示した。これは、島原半島内に恒常的にみられるブロック化した地殻変動の一部を捉えた可能性がある。
3. 長期間にわたる光波測距、特に自動連続測距システムによる観測手法を確立した。
4. 得られたデータを速やかに地方自治体等に還元することにより、防災対策に貢献することができた。

謝辞 島原市および長崎営林署には、観測点用地の借用

の件でご協力頂いた。九州大学島原地震火山観測所の太田一也教授を始めとする方々には観測に関する多くのご助言を頂いた。測量作業には、上田測量設計株式会社にお手伝い頂いた。また、観測点ならびに反射鏡点の設置に際して、工事関係者の方々には、急峻な崩壊地内での作業に協力して頂いた。データ収集・解析作業には、地質調査所環境地質部の曾屋龍典主任研究官、同部火山地質研究室の風早康平、川邊禎久両主任研究官にお骨折り頂いた。以上の方々に記して感謝の意を表す。

本研究のうち平成2年度は、科学技術振興調整費「雲仙岳噴火活動に関する緊急研究」により、また次年度以降は工業技術院特別研究「活火山の地質、地球化学及び地球物理的研究」および「活火山の形成過程と噴火活動機構に関する研究」の一部として行った。

文 献

- 片山信夫(1974) 島原大変に関する自然現象の古記録。九州大学理学部島原火山観測所研究報告，9，1-45。
- 国土地理院(1996) 雲仙火山GPS連続観測結果。火山噴火予知連絡会会報，66，113-114。
- 駒田玄久雄(1913) 寛永四年肥前島原眉山の破裂前後の状況に就いて，地質雑，20，(235) 150-162。
- 大森房吉(1908) 寛永四年肥前温泉岳の破裂。地学雑，15，(181) 447-450。
- 太田一也(1984) 雲仙火山。長崎県，58p。
- 太田一也(1987) 眉山大崩壊のメカニズムと津波。月刊地球，9，214-220。
- 渡辺一徳・星住英夫(1995) 雲仙火山地質図。火山地質図8，地質調査所。

(受付：1998年3月2日；受理：1998年4月16日)